特集：ダム構造物の影響 Feature: influences of dam structure

総説 REVIEW

ダム構造物と魚類の生活

森 誠一

岐阜経済大学経済学部生物研究室 〒503-8550 岐阜県大垣市北方町5-50

Seiichi MORI¹⁾: Dam and fish life-history—ecological perspectives in the environmental conservation. *Ecol. Civil Eng.* 2(2), 165-177, 1999.

1) Biological Laboratory, Department of Economics, Gifu-keizai University

Abstract: Damming causes many changes to the river. A dam and the resultant man-made lake change the river environment through a complex web of biological and physical impacts. The change from the river ecosystem to the lake ecosystem at the dam site will inevitably result in alteration of species composition, food habits and population dynamics of fishes. River impoundment affects endemic fish fauna and their life-histories through the following mechanisms: i. e., transverse blocking of the river channel, alteration of flow regimes and thermal regimes, and hindering upstream and downstream migration. Changes in fish communities have been recorded within considerable distances both upstream and downstream of dams. Hydropower reservoirs suffer high mortality if fish pass through the turbines. Since reservoir becomes a sink for sediments, seston transport is dramatically affected. Turbidity will increase during the construction phase and often over long distances. These constraints may lead to catastrophic falls in the abundance or extinction of some fish populations. The extinction might be associated with the introduction of exotic species. Flow regulation by dam can prevent or delay the inundation of floodplains and riparian zones, reducing or eliminating areas for breeding and reproduction of fish. These rapid and often extensive changes in the discharge regime cause displacement of fish, particularly juveniles, and can lead to loss of the fisheries. The modification of seasonal and diurnal thermal regulation causing the alteration of fish assemblages, usually results in reduction of species diversity in the river, when the dam releases the hypolimnial and/or epilimnial waters. The numerous unfavorable effects of impoundments and other forms of river regulation must be well documented for the planning and execution of future projects for the rehabilitation of water courses. Ecological evaluation is essential part of the programme on the base of "long-term environmental sustainability". It is hoped that the principles and guidelines of habitat improvement including the idea of removing dams will be made based on long-term ecological assessment.

Key words: fish life history and community, reduction of diversity, dramatical affection, rehabilitation

はじめに

自然環境の保全・維持を価値の第一義に位置付ける場合、河川生態系の劣化をもたらす構造物として、ダム (Dam) はその典型といえる。この種々の目的に応じて設置されたダムという河川内構造物は、河川環境への人工的負荷を極限にまで増大させる。流水を遮断するダムを境にして、上流域は湖となり湛水化し、下流域には減水を招く。概して、ダムや貯水池(ダム湖, impoundment)が大きくなるに従い、河川流量や水質あるいは水生生物は著しく影響を受ける(環境問題科学委員会編 1978; Maitland and Morgan 1997; Giller & Malmqvist, 1998)。

ダムの定義をここでは、高さ十数 m 以上で上流側に広く湖を形成する構造物とする。その基本的な目的は、洪水対策などの水量調節をする治水目的、利用水のための貯水および水力発電である。魚類にとっては、増水があっても高い段差があり、ジャンプして上流へ昇ることはできない構造物である。したがって、砂防堰や取水堰といった小型の構造物は、本稿の論点からは除外する。

ダムは、河川の環境特性に劇的な変化を生起させ、特に、流れの様式や温度分布の時間的・空間的体系を大きく変える(図 1; Allan 1997; Moss 1998; Cowx & Welcomme 1998)。こうした劇的な環境変化によって、魚類の生態はどのような影響を受けるのだろうか。本稿の目的は、魚類の生活にダム構造物が及ぼす影響を述べることであるが、想像や憶測の域を出ない部分が多々あ

る。なぜなら、特にわが国においては、人工構造物の生物への影響に関する生態学的な継続的研究は、すこぶる立ち遅れていると言わざるを得ないからである(森編 1998)。したがって残念ながら、ダムによって生じる環境変化から魚類が被る影響について記載した資料はきわめて少ない。今なお、それらの変化した環境要因の何が、何に、どの程度、どのように影響を与えているのかの研究は萌芽の段階にある。しかしながら、ここで憶測を交えて、魚類へのダム構造物の影響の可能性に関する整理作業を通じて、今後、魚類の生活を考慮したダムの在り方を記述しておくことも意味のあることだろう(足立 1997)。また、本稿のもう一つの目的は、自然への配慮をどのようにするべきか、という展望を提示するにある。

河川の魚類の生活

「魚類は、水の中にいる生物である」というだけの観点からは、自然への配慮をする目的に何の評価や貢献も生起させない。言うまでもなく、水さえあれば魚の生活が成立するわけではない。魚類の生活や生態は、いくつかに類型できる(水野・御勢 1972; 後藤 1987; 川那部・水野編 1989; 玉井ら編 1993)。例えば、海と河川を行き来する回遊性の魚類と、一生を定住的に淡水域で過ごす純淡水魚といった 2 つの生活史に大分される。回遊魚はさらに、海と河川の間を移動する際の発育段階によって、遡河回遊魚(サケ、イトヨなど)、降河回遊魚(ウナギ)、両側回遊魚(アユ)とに区分される。さらに、同種内であっても、成魚と未成魚など成長段階ごとに選択する環境条件や、個体群によって生活史に変異が認められることがある(Cowx & Welcomme 1998)。

こうした魚種やその成長段階によって、ダム構造物がもたらす環境変化への対応に差異があるということになる。ダムにもいろいろな目的があり運用方法が異なるように、魚種ごとに各々の生活史をもち多様な生態がある。したがって、ダムと魚類との関係を把握する際には、種類や個体数の調査だけでなく、その生活史の中でどのような影響をもつかを体系的に知る必要がある(環境問題科学委員会編 1978)。特に、回遊魚にとって、河川流を遮断するダム構造物は著しい影響を及ぼすであろう。ここではダム上・下流域の変化した特性に応じて、魚類の生活への影響を列挙してみたい。

Fig. 1. A conceptual model of the dam impact on fish fauna. —: biological changes, ---: physical and chemical changes, ———: drastic changes at the upstream and downstream of a dam.

ダム上流：湛水域（ダム湖）

魚類相の変化

奈良県十津川にある猿谷ダムで、ダム建設前と建設後の魚類相と生息密度の比較が推定されている（水野ら 1964）。ただし、ダム建設前の評価は事前調査によるのではなく、建設後のダム湛水域より上流部における調査結果に基づく推定である。そのダム建設前の推定によると、この川ではウグイがもっとも優占し、次いでカワヨシノボリとアユが多く占めるとされる（図2）。一方、ダムが完成した後のダム湖の調査によると、ウグイの激減が著しく、後二者の姿が見られなくなっている。それらに代わって、オイカワ、ゼゼラ、モツゴなどのコイ科魚類が激増している。また、コイやフナも増加しているという。ワカサギやヨシノボリも捕獲されるようになった（水野・名越 1964a, b）。

ここで留意しておきたいことは、種相や個体数の変化のみならず、増加した魚種のはほとんどがオイカワ、ゼゼラ、モツゴなどの移入種ということである。すなわち、ダム湖という止水域に適した移入種が優占的になり、もはや本来の構成種は消滅もしくは激減しているのである（図1, 2）。放流移入魚には、オオクチバス（ブラックバ

Fig. 2. Changes of fish fauna and the abundance for pre-impoundment and post-impoundment at the Sarutani dam constructed in the Totsukawa River, Nara Prefecture. Ugui: dace, Zezera: biwa gudgeon, Motsugo: topmouth gudgeon, Oikawa: pale chub, Kawamutsu: dark chub, Yoshinobori: common freshwater goby, Kawayoshinobori: lizard goby, Ayu: ayu fish, Wakasagi: smelt. (After Mizuno & Gose, 1972)

ス）やブルーギルのような外来魚と、特定水域に固有で、元々その水域にはいなかった本邦産在来魚（アユやアマゴなど）とに大分される。外来魚の例として、魚食性のオオクチバスは北アメリカから移入されたが、現在、ダム湖などの止水域を中心に全国的に生息が確認されるようになってきた。本種の放流によって、在来の魚種の個体数が激減することが知られている。いうまでもなく、この分布拡大は主に、いわゆるスポーツフィッシングもしくは遊魚という目的の放流に依存している。ダム本体やダム湖にいくら魚類に配慮した形で対応し設備を投資したところで、結果的に本来の魚類相が維持できない場合も多い。単に、“サカナ”がいればいいという観点からは、その水域の魚類特性を必ずしも反映しなくても、放流魚で賄えばいいという発想しか生まれない。

また近年、いっそう増加している琵琶湖産アユの放流に混入して、オイカワに限らず琵琶湖固有種のワタカやモロコ類などのコイ科、あるいはギギ（ハゲギギ）が分布を拡大している。この分布拡大の現場を、筆者はいくつかの漁業協同組合の放流事業で幾度か現認している。それらはダム湖への直接的な放流ではなかったが、周辺域にダム構造物などがある場所もあった。これらの結果、ダム湖の魚類相について水域間の地域特性が解消され、画一化に向かっていくだろう。これは「魚類相の琵琶湖化」現象といえよう。例えば、ギギは中・下流域に生息し、止水域に適応した生活史をもち、琵琶湖以西の河川に生息するが、一方、同じギギ科魚類であるネコギギ（国の天然記念物）は東海三県の伊勢湾・三河湾流入河川の中流域にのみ分布する（川那部・水野編 1988；渡辺・森 1998）。その清流の淵や平瀬を中心に生息するネコギギにとって、ダム湖は生活史から見て著しい悪条件をもたらす。ネコギギの生活史や生態（Watanabe 1994）から考慮すると、おそらく、ダム湖環境はその生息に壊滅的な影響を与えることが推察される。また、ギギに比べ体長が小さい上に攻撃的ではなく、競合すれば勝敗は明らかと思われる。これらのことは東海地方にあるダム湖にギギが放流されると、ネコギギの激減が一層促進されることだろう。

ダム湖より上流の流水域に生息するアマゴやカジカなどは、ダムによって出来た湛水域によって流入河川間の交流がなくなり、生息地が分断される。それら分断された生息地の規模が小さければ、その種はそれぞれで消滅しやすくなるだろう。つまり、止水域に適した魚類が増加し、渓流性の魚類は減少することになる。さらに、ダム湖の流入河川に分断孤立した個体群は、その集団サイ

ズが小さく、遺伝的な多様性も低くなることが推定され、結果、遺伝的劣化の速度が早まると考えられる。

水野ら (1964) も述べているように、ダム湖が形成されると底生生物相が激変し、プランクトンも大繁殖しやすくなる。それは群集組成ないし構成種からみると河川ではなく、やはり湖池の状態である。このことは魚類にとっての餌生物も異なることを意味し、特に、それはオイカワにおいて典型的に認められている。本種は平地流を好み、主に藻類を餌としており、ダムが多く建設される山間流の環境条件は生息に適していない。したがって、藻類の少ない山間流には、本来的に少ない魚種である。しかし、ダム湖の出現によってもたらされる止水域における餌生物の変化や稚魚の流下阻止の増大などにより、オイカワにとっては好適な生息場所が山間流に増加したといえる。その結果、本来的に少ないはずの個体数が激増したと考えられる (図2)。

また、水野ら (水野 1963; 水野・名越 1964b) は、オイカワやヨシノボリの産卵遡上が阻害されたことによるダム湖内の魚類相の変化にとどまらず、湖より上流域の在来種の生活にも影響を与えるだろうことを指摘してい

る。例えば、実際に、ダム湖流入河川の下流域ではオイカワが増え、逆に在来のカワムツの密度が減少している事例がある (伊藤・二階堂 1966)。

ダム建設は、川に湖を作ることである。この地形・地殻変動のタイムスケールにとって瞬時のダム建設はまず、流水の止水化や水深の深化という環境変化を急速に招く。それに伴い水温・水質・有機物などの非生物的環境要素と、水生植生やプランクトン相などの生物的環境要素の変化をもたらす (表1, Cowx & Welcomme 1998; 三橋・野崎 1999)。これらの環境変化によって、魚類相や種組成が異なっていく。さらに、ダム湖の環境に適した移入種による優占化に加え、水域間の魚類相特性の均一化を招くのである。

上流域の水温変化

水温は淡水生態系の環境要素として重要である。湛水域における水温分布は、場所によって水平的にも鉛直的にも異なっている。ダム上流に広がる湛水域の水温に関する研究は、イギリス南部の Haddeo 川の Wimbaleball ダムで十年にわたって実施されている (Webb & Walling 1993)。近隣のダムのない河川と比べて、全体的に平

Table 1. Effect of river impoundment on endemic fish fauna (after Cowx & Welcomme 1998)

Structural effects
1. Construction of dam
1) Obstruction to upstream or downstream migration
2) Loss of fry during passage over or through dams
3) Gas (e.g. nitrogen & oxygen) supersaturation
2. Creation of lake
1) Flooding of spawning grounds
2) Delays to migration of spawners through reservoirs to spawning grounds
3) Delay or stop to migration of fry downstream through reservoirs
4) Reluctance of fry to move through stratified water masses
Physico-chemical effects
3. Discharge, sediment load, water quality, food supply, channel form, riparian & aquatic vegetation
1) Unacceptable changes of seasonal discharge & water quality (particularly temperature) patterns
= Elimination of natural trigger-mechanisms for migration
2) Unnatural short-term flow fluctuations
3) Unnatural 'toxic pulses' of poor-quality water
4) Unsuitability of substrate for spawning
5) Low survival of eggs in gravels
6) Low amount of drifting food organisms
7) Changes of spatial and territorial requirements
8) High susceptibility of young fish to predation

Fig. 3. Water temperatures in some areas of the Columbia River are above optimum for salmon and trout. (After Oglesby et al. 1972)

均水温は上昇(0.1~3.7°C)し、水温の最大最小の変化が減少している。季節変化で最も著しいのは、秋期の水温低下の遅延であり、9月から12月の水温はダムのない河川より4°C以上も高かった。一日の最大温度差も、ダムのない河川と比較して半分であった。

アメリカ北西部のコロンビア川では、水温が一年のある一定期間、サケにとって深刻なレベルにあることが明白となっている。ダムの多い支流のスネーク川の水温の方が、合流部のコロンビア川より数度以上も高く、この温度差は、スネーク川へのサケ成魚の遡上をさえぎっている。同川のBrownlee Reservoir(92 kmに渡る湖状の湛水域)より上流の環境条件は夏期に深刻であり、表面温度は27度に達した。また、未成魚の方が成魚よりも水温上昇に対して、よりダメージを受けやすい(図3)。このような水温の上昇は、冷水性の魚類においては生息を困難にし、また逆に、温水を好む魚類にとっては成長率などにおいて好条件となるだろう(Giller & Malmqvist 1998)。

上流域にもたらす環境変化(堆積物、溶存酸素、生物的環境)

山間部の急流が止水域のダム湖内に流入することによって、土砂が急速に堆積することがよく指摘されている(図1)。スイスアルプスにあるような氷河河川では、堆積物の量は特に著しい(Petts & Bickerton 1994)。氷河が溶けた流水は大量の土砂を含んでおり、それは膨大な堆積物をダム湖内にもたらす。また、堆積物の量はダム湖上流や周囲から運ばれてくる他生性(allochthonous)堆積物(土砂、火山灰、塵などの無機物や生物体や死骸、泥炭などの有機物)だけでなく、ダム湖内に生息する生

物の遺骸や腐食からなる自生性(autochthonous)堆積物によっても変化する。湛水化に伴う水位上昇によって水中に沈んだ陸生植物が腐食し、次第に富栄養化を促進させ、酸素レベルを低下させる。それは時として、底層における無酸素状態を招く。コロンビア川水系において、サケ科魚類が選好する温度の水深における溶存酸素量は、わずか0から4 ppmの範囲であり、ほとんど致死的なレベルであったという(Oglesby et al., 1972)。

移植された水生シダが多くのアフリカのダム湖で急激にはびこり、葉の下の間接的な酸素不足を通して、水質に非常に影響を与えることが報告されている。こうした湛水と流速の減退による浮遊有機物の堆積や富栄養化は、一次生産の劇的な増加をもたらす。これらの結果、青ナイル川のSennarとRoseiresダムの650 km上流一帯にわたって、それまでより10~200倍もの植物プランクトンの増加があった(Hammerton 1972)。植物プランクトンの繁茂は、それまで生息していた魚類の餌環境を変化させる。また逆に、青ナイル川のRoseiresダムの湛水域では、数キロメートルにわたって貝類が植物プランクトンの繁茂により壊滅的になったという(Hammerton 1972)。

こうした水温、堆積物、溶存酸素量、富栄養化などの環境条件の変化は、魚類相や個体数に影響をもたらすことが容易に想定される。例えば、おもに瀬や流水域で繁殖する魚類にとって、湛水化はそれだけ繁殖場所の面積を減少させることになる。また、ダム湖およびその下流域でよく見られる土砂の堆積やシルト状の微細粒を含んだ濁水や水質悪化は、繁殖場所や卵発生および孵化に悪影響を与えるだろう。さらに、下流から魚道などを通じて遡った回遊魚は止水域のダム湖に入ると、泳ぐ方向性を見失い迷走し、エネルギー損失を被るかもしれない。逆に、海に向かって降下する魚種は流れに従って降りられず、湖内に溜まってしまうことがある。特に、サケ科魚類のように繁殖のため流れに向かって遡上し、未成魚は降海する回遊性魚類にとっては、ダム湖という湛水域の影響が顕著であると考えられる(Moss 1998; 森編 1998 参照)。

ダム下流域：減水域

減水と河川形態：流量の安定化

ダムの下流域では流量が減り、水域が激減する。上流域は貯水され止水域となるが、逆に下流は減水によって止水的となる。ダム運用の目的(利水、水量調節、発電)

に応じて放水流量のパターンは異なるようだが、強い管理体制をもつ流量制御のもとでは、大抵の場合、河川の流水域は縮小され湿性植物が前進し、周辺林が岸際まで広がってくる (Nilsson 1996). ある場合には、河川は干上がったり、水溜まり状態となってしまうほどになり、著しく水域面積が低下する (図 1, 表 1). 例えば、アスワンダムによって塞き止められた 1964 年以降のナイル川下流域では、年間流量はそれ以前のわずか 10 % に減少したという (Hargrave 1991). また、スウェーデン北部の流量制御された河川において、減水によって瀬と瀬の間の距離が 50 % 増加したことが報告されている (Malmqvist & Englund 1996). これらは減水に伴う生息可能面積の縮小や、急流域の消滅を意味するのである. このような減水にもとづく「早瀬の平瀬化」によって、平瀬を好む、例えばオイカワが増加し (水野ら 1958), アユやウグイの減少を明らかに招くとされている (水野・御勢 1972). つまり、その結果、水中および河畔の生物相に変化をもたらし、さらには死活問題にさえなり得る. そもそも水域の縮小は、魚類の生活空間を根本的に減少させることになる (川那部・水野 1970).

ダム下流の河川形態は、ダム湖の利用状態に概ね依存する. 洪水調整、用水、灌漑と発電などの用途目的に応じて、下流への流出量が時期的・時間的に異なる (Brooker 1981). 例えば、発電のために制御された河川流量の季節および日変化は、電力需要のパターンを反映している. その電力を供給するための放水流量は、昼中と週中に多く、夜間と週末に少なくなる (Allan 1995). きわめて短期間のうちに、下流の流量は変動するわけである. アメリカのメイン州ケネベック川の昼間流量は毎秒 170 m³ であるが、夜間はわずか毎秒 8.5 m³ になり河床面積の 25 % が水がなくなるという. すなわち、ダム管理の流量制御によって下流域は概して、長期的には低水期が長く安定し (Paulson & Baker 1981), 一方で、短期的には変動が著しく激しくなる (Moss 1998). このことはダム管理の運用方法によって、魚類への影響が大きく異なることを意味する. これは魚類の生息場所を不安定にし、とりわけ繁殖期の急速な渇水状態は壊滅的な打撃を与えることになるだろう.

下流域の水はプランクトンと懸濁物を多く含むダム湖の放水によって、常時的に濁ることが多い. ダムのない河川では出水増水時に一時的に濁るものの短期間で清流に戻るが、一方、ダムのある河川ではダム湖内で微細粒子やプランクトンが浮遊し、ダム湖とその下流域が長期的に白っぽく濁る (三橋・野崎 1999). それらは石の表

面や水底に薄く膜を張るように霧のように軟らかく沈殿し、付着藻類などの生育不良や水生昆虫の生息環境の悪化を引き起こしているに違いない. それは魚類の餌環境にも大いに影響を与えるだろう.

堆積物の減少

流量の減少はまた、下流域の土砂堆積を減らし、河川形態を変化させる. すなわち、流量制御は下流域における洪水に伴う氾濫原の形成や、肥沃な土砂の移動・堆積作用を弱める、もしくは停止させる (Paulson & Baker 1981). これは水生および陸生の生態系に大きな影響を与える. この土砂の流送の減少は海岸線に、さらに深刻で広範囲な影響をもたらす. ナイル川下流の三角州地帯において、アスワンダムの衝撃的な影響が明らかとなっている. かつての下流域への堆積物は海岸周辺の三角州の浸食を抑え、海洋生物に栄養分を供給していた. アスワンダム建設以後、地中海に注ぐ流量の劇的な減少は、ナイル川の三角州の浸食を急速に招き、次いで、沿岸の生産力を下げて重要な水産物を減少させる結果となった (Hargrave 1991).

河川と海洋の生態系の間には、汽水域という重要な移行帯がある (図 1). ダムによる河川流量の減少は、この汽水域も減退させる. この消失は海洋の生物生産の減少のみならず、二つの水域間における塩分濃度の断絶を生じさせ、汽水性 (ハゼ類、スズキなど) や回遊性 (サケ、イトヨ、カジカなど) の魚類にとって移動障害を河口域においてもたらすと思われる. ダム建設は海洋生態系の環境特性に変化をもたらし、沿岸域に生息する魚類の生態にも影響を与えることになるだろう.

完成されたダム本体からだけでなく、工事中の細砂土砂の流出と堆積も無視できない. 本来ならば、増水時に一時的にしか流れることのない細砂土砂が、工事期間中は常に流出し続ける. 工事の間中ずっと流れる細砂土砂によって、特に下流域の河床表面は不安定になり、魚類はもとより彼らの餌生物が定着することも困難となるのである. また、工事の際には、ダムの上・下流域周辺の河床は平坦に均されることが多く、魚類の生息環境として不適当になる. たとえ、ダム構造物にいかにも自然への配慮を施した施設、例えば魚の通過施設を作っても、工事自体によって魚類を含めた生態系全体が壊滅的になることも有り得る. 一時的であれ、一度、壊された生態系の修復・復元は非常に困難か、不可能である. ただ残念なことに、すでに水野・御勢 (1972) も 30 年近く前に指摘しているにもかかわらず、この課題に関する研究は国内においては今もって無いに等しいのが現状である.

下流域の水温変化

夏にダム湖の表層水を放水すると下流の水温はダムのない河川より高くなり、しばしば高酸素濃度をもたらすプランクトンの活動を高める。前述のイギリス南部のHaddeo川のWimbleballダムでは、ダムの下流5 kmにわたって影響があり、年間でかなりの変動があったという(Webb & Walling 1993)。

アメリカ北西部のコロンビア川に計画された水力発電施設の工事の前に、予測される高水温の影響に関する調査が始まった。この結果、もしこれらの発電施設が大規模に拡大せられ、その発電所から発生する消費熱による高温水が河川に何の配慮もされないままに放出されるならば、回遊性であるサケ科魚類の生存率はさらに悪化するであろうことが明らかになった(図3; Oglesby et al. 1972)。発電施設の排水口で、魚類は9~17度もの突然の水温上昇にさらされる。例えば、最大32度まで急速に上昇させた水域では、サケ科未成魚は数秒で死に至ることが実験で示されている。また、高水温は魚類の移動を鈍らせ、あるいは回避水域を増やし、回遊を遅らせることが考えられる。さらに、この水温条件は、細菌類や病原体の繁殖増殖を促すことがあるとされ、同時にサケ科魚類の餌生物量に影響し食物供給の低下をもたらす。一方、競争相手や捕食者となる種類の魚類にとっては、好条件となるかもしれない。

また逆に、水深が深いダム湖の場合、底層部(hypolimnion)は表層部(epilimnion)よりも水温が低いため、その放水によって下流の減水から生じる高水温を低下させることができるだろう。つまり、これは高水温になった下流域にとっては、その改善点の選択肢として成り立つかもしれない。コロンビア川のような事例は、日本ではサケやサクラマスが生息河川で起こりうるし、実際に起こっているであろう。このような場合には、底層水の放流によって水温調節することが可能であるかもしれない。ただし、この放水が本来の河川水温を大きく下まわる水温低下をもたらすならば、温水性魚種、例えばアユの生育に悪影響を及ぼすだろう。

溶存窒素とガス泡症

コロンビア川の夏の高温期における溶存窒素ガスの濃度は、予想されるより非常に高くなった(Oglesby et al. 1972)。この窒素の異常な高濃度は、発電施設のタービン内ではなくダム放水の直下水域で認められ、その過飽和がダムの放水落下という特性と関連があることを示している(Ebel 1969)。ダム本体の直下で、高い窒素濃度の中に長期間さらされた魚類はガス泡症といった実害

を被る。窒素飽和は河川の非湛水域で減少が認められたが、もっとも大量に湛水し放水量の多かった期間ではサケ・マス類にとって危険な濃度レベルとなった。さらに、ガス泡症の徴候が、小水路やコロンビア川下流に回遊してくる未成魚で観察された。上流域から移動する未成魚の河川における生存率は、ダム放水が開始される前の40%から、以後は15%に減少したという(Oglesby et al. 1972)。

下流域の溶存窒素濃度は1970年にダムが湛水されるまで、さほどの問題とはならなかった。この年の窒素飽和濃度は146%と高く、これ以降から回遊魚における窒素ガスの高濃度の影響が特に深刻になった。1970年には、Ice Harborダムで観察された回遊魚のチヌークサーモン(マスノスケ)の30%とスチールヘッドトラウト(ニジマス降海型)の40%の未成魚は、ガス泡症の徴候を示した。また、支流のスネーク川上流にある孵化場に達した成魚の約30%は、その症状を示した。ちなみに、この問題に対してアメリカ陸軍工兵隊(U. S. Army Corps of Engineers)は精力的な対応をしている。そのシミュレーションモデルは、流水、落下水、止水のような物理的パラメーターのもとで、窒素濃度の飽和レベルを予測することを開発させた。それに従った放水調整や上流の貯水管理を行ない、窒素ガスレベルをコントロールする方法が検討されている。

魚類の回遊および移動

魚類の生活におけるダムによる最大の影響の一つは、生活史の一環として行なわれる産卵遡上や海洋生活のための降下などを阻害遮断することである。

コロンビア川流域のダムと湛水域は当初、チヌークサーモンとベニザケ成魚の回遊率に深刻な影響を及ぼすように思われなかった(Oglesby et al. 1972)。実際に、それらの魚がBonnevilleからRock Islandダムに移動するために必要とした時間は、ほとんど全域的に湛水化されていた24年間にわたって同じであったという。現在のベニザケはRock Islandダムに着くまでの中間に障害が存在する以前よりも、2日だけ多く必要とするだけであった。ただし、その2日間の遅れが、サケにとってどのような意味をもつのかはわかっていない。スネーク川ではBrownlee Reservoirに放流されたチヌークサーモン成魚の中には、流程が92 kmにもなる湖状になった湛水域を通り抜け、その上流域で産卵をした個体もいた。しかしながら、これらは遡上サケ全体としてダムの影響

がさほどなかったということではなく、そういう個体もいたという定性的な意味である。ダムとダム湖はサケ・マス成魚の全体的な産卵回遊において深刻な影響を与え、その結果、繁殖場所までの到達率は非常に低かったのである。

湛水域はコロンビア川の流速を減少させたために、サケ・マス未成魚の下流への移動に影響を及ぼした。1968年に John Day ダムが完成した後、未成魚の McNary ダムから John Day ダムまでの移動は、ダム完成以前の約3倍近くの日数が必要と算定された。支流のスネーク川でも同様な結果が得られた(表2)。スネーク川の Brownlee Reservoir を通過するチヌークサーモン未成魚の個体群サイズは、移動時の湛水域の流量と関連があった。つまり、広範囲にわたる湛水域での移動の遅延は、それだけ長期間、高水温や窒素ガスの高濃度、捕食者、他種との競争圧を魚類に被らせることを意味する。また特に、降海する未成魚は発電施設への取水口に巻き込まれたり、放水に混入して大きなダメージを被る。その結果として近年、上流から河口への未成魚の移動の間の致死率が、ほぼ90%と高く推定された。

ダムは広く回遊する遡河および降海性の魚類のみならず、河川内に定住的な魚類の移動においても大きな打撃を与える。それは前述したように、河川として一つであるかもしれないが、下流から上流への交流がない分断されたより小さな生息地ができるからである。河川がいくつものダムで遮断された結果、一つ一つの細分化された水域で魚類は必然的に小さな個体群となる。こうした集団サイズの縮小は、遺伝的な劣化を促進させる可能性があるといわれている(プリマック・小堀 1997)。

魚類の保全のために

ダムは、言うまでもなく魚類の移動障害となる。その障害の程度は河川や設置位置あるいは時期によって様々であろうが、種や成長段階など魚の側からも影響の程度が異なる。このダムによる河川環境の変化は魚類の生活や生態に大きく影響を与え、ほとんどの場合、環境条件を悪化させる。ここでは、そうした環境下に置かれた魚類に対して、自然への配慮事業が実施されていく中で、今後の留意点や必要不可欠な対処をこれまでの問題点を含めて整理しておきたい。

増殖事業

これまでも、特に、サケ・マスなど漁獲対象魚の増大のために、多様な方法手段が考案されている。まず手取り早い方法は、人工的に増殖した魚の放流事業による資源保全である。

例えば、コロンビア川のダム開発においては、魚類資源の保全が精力的に実施されている。コロンビア川の水産資源量は最大漁獲高であった1911年の22440トンから、後に年平均およそ6800トンに減少した。この水産資源の消失は、ダムなどの水資源開発事業と関連していると考えられている。コロンビア川ではサケの増量を目的とする計画が実施され、21箇所の孵化場が造成、改築された。サケ科魚類の増殖量は、1949年の1000万尾から1970年の1億尾に増加した。1945年に Bonneville ダムの上にいるチヌークサーモンの5.8%は孵化場由来と推定された。1970年代には、約33%のチヌークサーモンと85%のコーホーサーモン(ギンザケ)は孵化場産であるが見積もられ、またスチールヘッドトラウトの増殖技術も改善された。1962年に始められた大規模な評価プログ

Table 2. Effects of impoundment on the rate of migration of juvenile chinook salmon in the Snake R. and the Columbia R.

Section of river	Distance (km)	Elapsed time (average days)	
		Pre-impoundment	Post-impoundment
Salmon River to Ice Harbor Dam	370	15	25
Ice Harbor Dam to McNary Dam	68	3*	9
McNary Dam to John Day Dam	122	5	13
Peak of migration John Day Dam		May 2	June 3

*An estimate based on the rate of migration between McNary Dam and John Day Dam site before the river was impounded. (after Oglesby et al. 1972)

ラムでは、コロンビア川沿岸で漁業および遊魚漁で捕獲された約50%のチヌークサーモンとコーホーサーモンが孵化場産であることが示された。また、スウェーデンやフィンランドなどの北欧諸国においても、発電開発で損失した代償として、河口で放流するスモルトを養魚場で飼育している。もちろん、これは河川環境のためというよりも、バルト海沿岸におけるサケの水産業を維持するためである。これらのことから、放流事業はその放流された魚種の生産にとっては一定の効果をあげているといえるが、それだけでは河川環境の維持復元にはつながらない。つまり、こうした単に、河川を生簀のようにして魚を放流するという発想からは、歴史的に培われてきた本来のその河川流域の特性を否定することになりかねないと思われる。

魚道

魚類がダムを通過するための魚道などの施設は、初期のダムにはほとんど設置されないか、魚類の生態を考慮しない単なる階段式のものであった(図4)。それゆえ、回遊性の魚類は遡上を著しく遮られ、壊滅的な打撃を被った。また、大きな湛水域となったダム湖や灌漑取水によって、海へ降下する多くの未成魚が消滅した。魚道のないダムは、遡上サケ個体群をほぼ完全に消滅させる(Nehlsen et al. 1991)。カリフォルニア北部のKlamath川にあるダムはチヌークサーモンに、また、アイダホ州のClearwater川にあるダムはチヌークサーモンとスチールヘッドトラウトに対してかなりの打撃を与えている。

コロンビア川のBonnevilleダムで実施された調査実験は、魚類がダムを通過して上流に移動する能力や行動

習性などを検証して、どのような条件が必要であるかを解析する目的であった(Oglesby et al. 1972)。種々の刺激や環境と関連づけて魚類の行動が調査され、魚道に成魚を誘導させる実験が行なわれた。この実験研究によると、魚類の通過率は、魚道のサイズや傾斜、開口部の構造に対する魚類の反応によって異なることを示した。その調査結果に基づいて、より経済的で効果的な魚道が設計され、新しいダムに設置された。現存するダムの魚道の操作手続きと設備は、実行可能な形で修正されているのである。すなわち、魚道という名の構造物を設置すればいいのではなくて、いかに効果的であるかを評価検証しつつ改善する努力が払われていることを、ここで強調しておきたい。

さらに、流量が制御されて放水量が減る場合、むしろ未成魚はダム施設内に入りやすくタービン内を通ることが予想される。タービンによる未成魚の直接的な損失は、10%から20%と推定され、止水域における捕食者による間接的な致死を加えると、およそ35%に増加した。タービンへの迷入を避けるために、タービン上部の取り入れ口からバイパスが設置された。魚はここを通過して、下流に安全にいくことができるように工夫されている。また、危険なタービンへの取水口を回避させ、輸送用タンクへのバイパスに誘導する迷入防止スクリーンが開発されている。このようなダムに導入された施設は、ダムにおける即時の致死率を軽減するが、ダム本体の中の厳しい環境から魚を本質的には守らない。

いずれにしても、わが国においては残念ながら、これまで魚類の側から魚道の効果評価が行なわれたことはあまり無いのが現状なのである。今後、魚類の生活を踏まえた定量的な評価に基づいて、魚道の構造設計が行なわなければならない(廣瀬・中村 1991)。

捕獲と輸送

下流に移動する魚の生存に関する研究が進むと、広く行きわたった環境悪化によって起こる未成魚の深刻な損失は、コロンビア川流域の全体のサケ・マス資源を危険にさらすことが明らかになった。魚にダム構造物を迂回させる方法は、当面のことを考えると実際的であるかもしれないが、結局、湛水域を通過する際に魚は継続的なストレスを被るだろう。そこでより人為的な工夫として危険な場所へ行く前に捕獲し、安全な場所へ輸送する方法がとられた。ここでの基本的な問題は、(1)生存率が增加するか、(2)未成魚の輸送によって、彼らが成魚として海から戻るとき、母川回帰と産卵場所への到達に影響を与えるかどうかである。

Fig. 4. An example of the reasonably designed fish way at the Meiji-yosui Dam in the Yahagi River. The gentle gradient and small steps are required for allowing fish to migrate through dams.

未成魚のサケを集め 300 km 下流へ輸送し、標識再捕法による実験が、スネーク川で最下流のダムである Ice Harbor ダムで検証された。その結果、下流域における未成魚の生存が、標識個体の回収によって認められた。さらに、成魚として回帰した魚が Ice Harbor ダムや産卵場において、また漁獲およびスポーツフィッシングによって確認された。これらの下流に輸送された魚は、成魚となって Ice Harbor ダムにうまく戻って上流の産卵場へ移動し、この輸送が母川回帰本能にはさほど影響を及ぼさなかったと、当初は判定された。しかし、定量的な評価をし始めると、全体量としては頗る少ないことがわかった。サケが再生産していくためには 2~6 % の回帰率が必要とされているが、最近の調査結果によれば回帰率は 0.2 % と劣悪な現状にある。

また、回帰率に対する窒素濃度や他の致命的な要因への輸送効果も証明されている。例えば、放水前に輸送放流した未成魚グループの回帰率は 90 % であり、それに対して窒素濃度が高い放水期間中に放流されたグループはわずか 10 % であった。この結果は、危険な場所に至る前に、時期を考慮した魚の捕獲と輸送が、生存を増やす実地的な方法であることを示している。ここでは、魚の捕獲や輸送が与えるストレスに関する研究が必要である。

実態把握のために

定量と継続に基づいて評価できる実態調査

自明ながら、魚類はダムのある河川生態系に適応してきたわけではない。河川管理の人工的制御に、彼らは本来的に付いていけない。その影響はほとんどの場合、全か無かではなく、全から無の間で様々な様相がある。だが、その人工構造物による生物への影響の程度はあまり把握されていないのが現状である（玉井ら編 1993）。どの程度、魚類が人工的な環境変化に対して付いていくのか、また、いけないのかをまずは知るべきである。しかも、魚類のために設けられた、例えば魚道をいかに魚類が利用しているか、あるいは利用していないかを定量的に把握し、何が良くて何が悪いのかを評価する必要がある。それは、かつ継続的でなければならない。でなければ、その調査結果が果たして、減少傾向にあり悪化状態であるのか、良好で問題がないのかを判定できない（図 5）。つまり、例えば、一時点の生物量の調査だけでは、それが増加傾向（図中の 3）にあるのか減少中（図中の 1）であるのか、あるいは変化がない（図中の 2）のかを位置付けできないからである。

Fig. 5. Necessity of continuous investigations for proper evaluations of damming.

コロンビア川の実例から

コロンビア川はアメリカ北西部で最長流程をもつ河川（流長 1950 km）である。18 世紀後半に西部開拓の白人が到達して以来、この川はアメリカ合衆国の中で最も開発された河川の 1 つである。本川は商業輸送と水産業のために広く効率よく利用され、次第に、さらに多くの目的をもつようになった。その後、商業と産業を維持する水資源需要の増大に応えるために、コロンビア川水系は電力と灌漑などのために著しく利用され、多くのダムが建設されるようになった。

コロンビア川における漁業資源の管理は、1800 年代後半に設立された州水産局の権限下であり、関係省庁との共同研究が蓄積されている。その調査結果を通して、漁獲規制は確立し孵化場施設が急速に増加した。全てのダムに魚類の保全に関わる施設の必要性が法的に義務付けられ、通過施設の設置や産卵域の改善によって水産資源の保持開発が行なわれた。1938 年に、連邦政府による研究プログラムに沿って、コロンビア川のサケ科魚類の回遊と生存に関わる基本的な調査が全水系的に始められた。その結果、魚道など魚類の通過施設が、ほとんどのダムで必要とされた。魚道は改善され、ダムにおける遡上・移動量を把握するために魚類の個体数が計数された。また、連邦および州政府の機関は、遡河性の魚類を中心とする水産資源に対する高水温の影響を調査し続けている。1949 年にコロンビア川下流域開発計画は、連邦政府の水

利用計画のために失った魚類と、その生息場所の保全を目的の基礎にした計画に適正化された。この計画は1957年に、さらに上流域を含めるように拡充されている。

コロンビア川の水産資源の初期調査は、おもにサケ科魚類の分類学や生理学の研究に集中していた。その後、サケ個体群の環境変化から受けるストレスが増加するにつれて、回遊時期、繁殖場所、生物量、移動などに与える影響に関する研究課題に向けられた。1970年前後より、支流のスネーク川におけるサケ科未成魚の致死率の著しい増加が調査によって明らかとなり、主にサケとスチールヘッドトラウトの個体群の危機的状況が顕示された。ここで、州水産局は全米海洋漁業局（National Marine Fisheries Service）とアメリカ陸軍工兵隊と協力的に、約480 km 下流に移動する未成魚の生存と母川回帰への影響を調べている。そこで、約10万尾のマーキング放流再捕による実験がされた。生存率推定や回帰した成魚の状況が、漁業漁獲や産卵場に至るまでの種々の移動ポイントで追跡調査されている。

調査の在り方：一つの指針

以上のような生態学的調査と評価は、わが国のダム湖における生態系や生物資源への把握現状をみる場合、もっとも必要とされている内容である。わが国のこれまでのダム湖の生物環境の把握の仕方、つまりはアセスメント調査は種名を列挙することが中心であった。それは調査結果として、100種よりも110種の方が直ちに高い評価が与えられることになる。だが、ダムの水生生物への影響評価にはむしろ生態学的な種内・種間関係や、生物と生息環境との関係を定量的に抑えることこそが肝要である。この生態学的調査は特に、単一の種を見る場合、摂餌と繁殖という2つの生物現象に視点を置いて実施されるべきだろう。すなわち、生物種のリスト作成だけを目的とするだけでは、例えば、生態系は理解されない。種名と種数を調べ上げることは必要な作業ではあるが、それは基礎的な作業であり目的ではないことを認識するべきである。それらの一定範囲の中での“登場人物”における親子、競争、配偶などの種内の個体間関係や、食う食われる関係や寄生関係などの種間関係、生物と非生物的環境との関係を踏まえた形で、全体像をいかに合理的（定量性と継続性）に表現するかが問題なのである（森編 1998）。言うまでもないことだが、すべての種についての関係を調べ上げることは不可能であるが、いくつかの類型化されたグループやその代表的な種をキイとして想定して、生物間のシステム体系を構築していくのである。

例えば、ダム建設予定地で魚類相の調査をするとして。そこではまず、その調査には同定の正しさが要求され、マニュアルや資料文献に即して個々の種としての現在の状況（希少性や生態的地位）が位置付けられる。その魚種が希少でレッドデータ・ブック選定種などであった場合、大抵その種がその地域周辺の特性を示す種とされる。しかし、問題はそれからである。その魚類が予定地内をいかにして摂餌や繁殖に利用しているかを、また、彼らの生活にとって何が重要な環境要素であり、その要素が予定地内にどの程度あるのかを定量化することが望まれる。それをもって初めて、ダム事業の影響が検討されるべきであり、また自然への配慮事業が実施されるべきなのである。つまり、その種はその水域をそもそも生活圏としてさほど利用しておらず、偶々見つかったものと判断されることもありうる。そうした箇所に莫大な費用をかけて、例えば魚道を設置してみても無駄な投資であり、あまり意味がないだろう。しかも、遡上・降下の魚類の側からの評価をしないまま魚道を作っても、土木学的構造の研究成果を自然に配置するだけで、本来の目的の達成にはつながらない。今後、魚への配慮事業における構造物の作り放しの状態から、現存する構築物の生物に与える影響の生態学的評価を反映した計画施工が要望される。このことは、いくら強調してもしすぎることはない。

魚道から撤去まで

これまで魚類がダム構造物と付合うための方策が、前述してきたように採用されてきた。魚からすれば、喜んでうまくは付合えないに違いないけれども、水産資源の確保や自然への配慮として、1)魚道の設置やタービン施設の改善（迷入防止スクリーンなど）、2)ダム上・下流で魚を捕獲し、上流もしくは下流への輸送放流、3)人工増殖魚の放流などが施されてきたのである。

しかしながら、これらはダム構造物が先にありきの方策であり、それに基づいた議論に即している。現在のダムの影響の実態調査やダム建設前の事前調査においても、ダムの存在や建設を前提とした形で行なわれている。撤去や建設不可という項目も、ダム問題の視野の中に入れる必要がある（Shuman 1995）。計画が出来た段階で、ダムは存在するものではないはずだ。もちろん、すべてのダムを直ちに問題視および危険視しているのでは、まったくない。河川の再生や蘇生を真摯に考えるならば、ダムの撤去も選択肢の一つとして考慮し、多くの可能性に

ついてシミュレーションする価値が十分にあるということだ (Palmer 1986)。

その事例がアメリカ北西部ワシントン州のエルワー川にある (Shuman 1995)。エルワー川ではアメリカ北西部に生息するサケ・マス類の全 10 種が激減し、うち 2 種が絶滅しているという (Joseph 1999)。内務省は 1992 年に、「エルワー川の生態系および天然サケ・マス漁の回復に関する法律」(Elwha River Ecosystem and Fisheries Restoration Act) を議会に提出した。そこで本川に設置されたエルワー・ダムとグラインズ・キャニオン・ダムの撤去が 1994 年に採択され、現在、連邦政府の予算待ちになっている。これらは 90 年ほど前に作られた古いダムである。100 年足らずで古いと言っていいのかわからないが、いずれにしても、漏水などの老朽化と電力供給の能力・貢献低下に加え、エルワー川では何よりも環境保全と復元が第一義的に位置付けられ、不要撤去と結論された (日本生態系協会 1997; Joseph 1999)。

これらの背景には、アメリカでは「魚類および野生生物調整法」(Fish and Wildlife Coordination Act, 1934 年制定) や「絶滅の危機にある種に関する法律」(Endangered Species Act, 1973 年制定) といった法規があり、機能的に効力をもっていることが挙げられる。つまり、魚類野生生物局 (Fish and Wildlife Service) は内務省に、全米海洋漁業局は商務省に属して、一定の権限が与えられ、かつ互いに協力的・補完的に法律が行使されているのである。また、アメリカ内務省魚類野生生物局の『絶滅危機種保護プログラム』への予算は 1990 年からわずか 5 年間で 3 倍以上になり、8330 万ドルとなっている。環境保全に対する国の取り組みの程度は、こうした予算計上にも端的に現われている。以上の法的・行政的な裏付けをもとにして、エルワー川のダム問題については、地域住民や自然保護団体あるいは、工学や生物学、地質学などを含む研究者が、様々な立場から多くの発言をし、かつそのような機会を事前に与えられている。

もちろん、エルワーダムといった個々のダム問題への対応だけに終始してはならない。単に魚類の生活環境を保全整備するという個別な観点だけでなく、わが国においては、河川流域全体や、さらには国土や地域の自然保全や回復に対する原則の策定とシナリオを描くことが、同時に求められているのである (Newson 1992; 天野礼子 1997; 森 1997)。それこそが、個別な魚類の生活を保全するため、抜本的な問題解決につながる。すなわち、生態系や魚類の実態調査の実施と、それを支持するための法制度の確立が早急に望まれる。

すでに存在しているからというだけで恒久的とみなす必要も、また、計画段階であるに過ぎないものを変更不可能な決定事項と必ずしも考える必要はない。それは人間が作り出すものであり、いずれにしても老朽化は免れず、目的を達成しなくなるという原理的な性質をもっている。したがって、更新と建設の見直しは、恒常的に存在する課題とすることができよう。ただ、それは正論で総論賛成として理解はできるが、現実的でなく個々の問題であり統一的にはなかなか扱えないという見解もあろう。しかしながら、そうした態度であり続けることも問題である。現実的であることは物事を進めていく上で自明のごとく重要であるが、一方で、理想のないところに新しい展開はないということも自明であろう。

摘 要

ダム構造物およびダム湖という湛水域は、環境の生物的・物理的な構成要素に影響を及ぼす。湛水域には堆砂が増加し、下流へ大量の濁水が、特に建設工事中や増水時に流出する。ダムの放水運用によって、河川水量は季節や一日の内で短期間に大きく変化する。こうした河川から湖への生態系の変化は必然的に、魚類相、魚類の餌生物相、個体群動態の変化を引き起こし、水産業にも打撃を与える。例えば、ダムは魚の上流や下流への移動を妨害し、魚類群集の変化がダム上・下流の広い範囲で認められた。湛水域は在来種の産卵場所を消失させ、個体数の激減を導く。また、湛水域に放流された移入魚の増加は、在来種の絶滅と関連することもある。こうしたダム構造物や湛水域、水量管理による魚類への多くの不利な影響とその改善策を、水域の環境復元のための将来計画を立てる上で十分に考慮調査されなければならない。今後、長期の持続的な生態学的評価に基づいて、ダム除去を含む河川生態系改善のためのシナリオを作成することが切望される。

引用文献

- 足立敏之 (1997) ダム建設と環境保全。土と基礎, 45: 15-18.
- Allan J. D. (1997) Stream ecology. Chapman & Hall.
- 天野礼子 (1997) 川は生きているか。岩波書店.
- Brooker M. P. (1981) The impact of impoundments on the downstream fisheries and general ecology of rivers. Adv. Appl. Biol. 4: 91-152.
- Cowx I. G. & Welcomme R. L. (eds.) (1998) Rehabilitation of river for fish. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) by Fishing News Books.

- Ebel W. J. (1969) Supersaturation of nitrogen in the Columbia River and its effect on salmon and steelhead trout. U. S. Fish Wildlife Serv., Fish Bull. **68**: 1-11.
- Englund G. & Malmqvist B. (1996) Effects of flow regulation, habitat area and isolation on the macroinvertebrate fauna of rapids in north Swedish rivers. *Regulated Rivers* **12**: 433-445.
- Giller P. G. & Malmqvist B. (1998) The biology of streams and rivers. Oxford Univ. Press.
- Gordon N. D., McMahon T. A. & Finlayson B. L. (1992) Stream hydrology. John Wiley & Sons.
- Gore J. A. (ed.) (1985) The restoration of rivers and streams. Butterworth Publishers, Boston.
- 後藤 晃 (1987) 淡水魚—生活環からみたグループ分けと分布域形成「日本の淡水魚類」(水野・後藤編), 1-15. 東海大学出版会.
- Hammerton D. (1972) The Nile river - a case study. In *River ecology and man* (ed. Oglesby et al.), pp. 171-214. Academic Press, New York.
- Hargrave B. T. (1991) Ecology of deep-water zone. In *Fundamentals of aquatic ecology* (ed. Barnes and Mann), pp. 77-90. Blackwell, Oxford.
- 廣瀬利雄・中村俊六 (1991) 魚道の設計. 山海堂.
- 伊藤猛夫・二階堂要 (1966) ダム湖の上流および下流における魚類の量的分布. *魚類学雑誌* **13**: 4-6.
- Joseph P. (1999) The battle of the dams. *Smithsonian*, 48-61.
- 川那部浩哉・水野信彦 (1970) 江川本流の河川形態の現況と過去の状態の復元の試み. 「江川水系の生物に関する総合開発調査」(川那部編), 5-20.
- 川那部浩哉・水野信彦編 (1988) 日本の淡水魚. 山と溪谷社.
- 環境問題科学委員会 (SCOPE) 編 (1978) (都留信也・松井健訳) 人造湖生態系. (社) 環境情報科学センター, 東京.
- Maitland P. S. & Morgan N. C. (1997) Conservation management of Chapman & Hall, London.
- 三橋弘宗・野崎健太郎 (1999) 三重県宮川における糸状緑藻 *Sporogya* sp. の大発生. *陸水学報* **14**: 9-15. 奈良.
- 水野信彦 (1995) 魚にやさしい川のかたち. 信山社サイテック, 東京.
- 水野信彦 (1963) ヨシノボリとカワヨシノボリの分布-I. 湖と池の付近について. *日本生態学会誌* **13**: 242-247.
- 水野信彦・名越 誠 (1964a) 奈良県猿谷ダムの魚類-II. 続生息状況のあらまし. *日本生態学会誌* **14**: 61-65.
- 水野信彦・名越 誠 (1964b) 奈良県猿谷ダムの魚類-III. オイカワの生活. *生理生態 (京都大学)* **12**: 115-126.
- 水野信彦・御勢久右衛門 (1972) 河川の生態学. 築地書館.
- 水野信彦・名越 誠・森 主一 (1964) 奈良県猿谷ダムの魚類-I. 生息状況のあらまし. *日本生態学会* **14**: 4-9.
- 水野信彦・川那部浩哉・宮地伝三郎・森 主一・児玉浩憲・大串竜一・日下部有信・古屋八重子 (1958) 川の魚の生活-I. コイ科魚類4種の生活史を中心にして. *京都大学生理生態業績* **81** (1).
- Moss B. (1998) *Ecology of freshwaters*. 3rd ed. Blackwell Science.
- 森 誠一 (1997) トゲウオのいる川: 淡水の生態系を守る. 中公新書, 中央公論社.
- 森 誠一 (1998) 自然への配慮としての復元生態学と地域性. *応用生態工学* **1**: 43-50.
- 森 誠一編 (1998) 魚から見た水環境: 復元生態学に向けて. 信山社サイテック.
- Naiman R. J. (ed.) (1992) *Watershed management*. Springer-Verlag, New York.
- Nehlsen W. Williams J. E. & Lichatowich J. A. (1991) Pacific salmon at the crossroads: stocks of salmon at risk from California, Oregon, Idaho, and Washington. *Fisheries* **16**: 4-21.
- Newson M. (1992) *Land, water and development*. Routledge, London & New York.
- Newson M. (1994) *Hydrology and the river environment*. Clarendon Press, Oxford.
- Nilsson C. (1996) Remediating river margin vegetation along fragmented and regulated rivers in the north: What is possible? *Regulated Rivers* **12**: 415-431.
- 日本生態系協会 (1997) アメリカの自然生態系を守る制度とダム. (財) 日本生態系協会, 東京.
- Oglesby R. T., Carlson C. A. & McCann J. A. (eds.) (1972) *River ecology and Man*. Academic Press, New York.
- Palmer T. (1986) Endangered rivers and the conservation movement. University of California Press, Berkeley, Cal.
- Paulson L. J. & Baker J. R. (1981) Nutrient interactions among reservoirs on the Colorado River. In *Proceeding of the Symposium on Surface Water Impoundments* (ed. Stefan, H. G.), pp. 1647-1656. American Society of Civil Engineers, New York.
- Petts G. E. & Bickerton M. A. (1994) Influence of water abstraction on the macroinvertebrate community gradient within a glacial stream system: La Borgne d'Arrolla, Valais, Switzerland. *Freshwater Biology* **32**: 375-386.
- ブリマック R. B.・小堀洋美 (1997) 保全生物学のすすめ. 文一総合出版.
- Shuman J. R. (1995) Environmental considerations for assessing dam removal alternatives for river restoration. *Regulated Rivers: Research and Management* **11**: 249-264.
- Takahashi G. & Higashi S. (1984) Effect of channel alteration on fish habitat. *Japanese Journal of Limnology* **45**: 178-186.
- 玉井信行・水野信彦・中村俊六編 (1993) 河川生態環境工学. 東京大学出版会.
- Watanabe K. (1994) Growth, maturity and population structure of the bagrid catfish, *Pseudobagrus ichikawai*, in the Tagiri River, Mie Prefecture, Japan. *Japan. J. Ichthyol.* **41**: 15-22.
- 渡辺勝敏・森 誠一 (1998) 橋の架け替え工事に伴うネコギギの生息場所の変化. 「魚から見た水環境」(森編), 161-176.
- Webb B. W. & Walling D. E. (1993) Temporal variability in the impact of river regulation in thermal regime and some biological implications. *Freshwater Biology* **29**: 167-185.